

Braunschweigische  
Wissenschaftliche Gesellschaft

# Jahrbuch 2016

Sonderdruck  
Seiten 100–114



J. CRAMER Verlag • Braunschweig  
2017

## **Endlagerforschung: Technische Herausforderungen vor dem Hintergrund gesellschaftlicher Konflikte\***

KLAUS-JÜRGEN RÖHLIG

Institut für Endlagerforschung, Technische Universität Clausthal  
Adolph-Roemer-Straße 2A, D-38678 Clausthal-Zellerfeld  
E-Mail: klaus.roehlig@tu-clausthal.de

### **Einleitung**

Nach der faktischen Beendigung der Debatte um die Stromerzeugung aus Kernenergie in Deutschland, also nach der in Reaktion auf das Tōhoku-Erdbeben, den anschließenden Tsunami und die Reaktorunfälle in Fukushima im März 2011 eingeleiteten so genannten „Energiewende“, entstand auch die Möglichkeit, den mit dieser Debatte eng verknüpften gesellschaftlichen Konflikt um den Umgang mit den radioaktiven Abfällen (insbesondere den hoch radioaktiven oder Wärme entwickelnden Abfällen) zu lösen. Nachfolgend soll ein Überblick über die verschiedenen Arten radioaktiver Abfälle, Ansätze zu ihrer Entsorgung sowie zur diesbezüglichen Situation in Deutschland gegeben werden.

### **Kategorien radioaktiver Abfälle**

Radioaktive Reststoffe entstehen nicht nur in Zusammenhang mit Kernenergie, sondern in geringeren Mengen z.B. auch bei der Nutzung von Radioaktivität bzw. ionisierender Strahlung<sup>1</sup> in der Forschung, der Industrie und in der Medizin. Sie fallen in sehr unterschiedlichen Formen an. Beispiele sind Laborschutzbekleidung,

---

\* Der Vortrag wurde am 09.07.2016 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

<sup>1</sup> Bestimmte Nuklide (gekennzeichnet durch eine bestimmte Anzahl von Protonen und Neutronen im Atomkern; verschiedene Nuklide eines Elements werden als Isotope bezeichnet) sind instabil und damit radioaktiv. „Instabilität“ bedeutet, dass sich die Atomkerne spontan umwandeln oder ihren energetischen Zustand ändern und dabei Energie in Form von ionisierender Strahlung freigesetzt wird. Diese Eigenschaft wird als Radioaktivität bezeichnet, der leider häufig verwendete Pleonasmus „radioaktive Strahlung“ ist jedoch inkorrekt (der Stoff ist radioaktiv, nicht die Strahlung).

Bauschutt aus zurückgebauten kerntechnischen Anlagen, Abluftfilter, bestrahlte (auch „verbrauchte“ oder „ausgediente“) Brennelemente bzw. Kernbrennstoffe und verschiedenartigste Reststoffe aus der Wiederaufarbeitung solcher Brennelemente (s. unten). Es gibt große Unterschiede hinsichtlich der physikalischen Form und der chemischen Zusammensetzung, vor allem aber unterscheiden sich die Abfälle durch zwei Charakteristika, die sich unmittelbar auf das Phänomen Radioaktivität beziehen: Aktivitätsgehalt sowie Lebensdauer bzw. Halbwertszeit:

Radioaktive Abfälle weisen (sehr) unterschiedliche Konzentrationen von Radioaktivität auf. Die Maßeinheit für Radioaktivität ist das Becquerel (Bq)<sup>2</sup>. Die Spanne der Aktivitätskonzentrationen in den Abfällen reicht von weniger als  $10^{10}$  bis zu mehr als  $10^{17}$  Becquerel (Bq) pro m<sup>3</sup>. Die in den Abfällen enthaltenen Radionuklide besitzen unterschiedliche Halbwertszeiten, so dass die kurzlebigsten als praktisch nicht vorhanden bzw. „sofort“ zerfallen angesehen werden können (Beispiel <sup>16</sup>B mit weniger als  $190 \cdot 10^{-12}$  Sekunden), während die langlebigsten praktisch gar nicht zerfallen (Beispiel <sup>232</sup>Th mit einer Halbwertszeit von 14 Milliarden Jahren).<sup>3</sup>

Verbrauchte Kernbrennstoffe enthalten eine Vielzahl unterschiedlicher Nuklide:

- Aus der Kernspaltung entstandene „Spaltprodukte“ mit einem Überschuss an Neutronen, welche meist so genannte  $\beta$ -Strahler sind. Beispiele sind <sup>90</sup>Sr und <sup>137</sup>Cs.
- Durch Neutronenaufnahme entstandene so genannte Aktivierungsprodukte, welche meist  $\gamma$ -Strahler sind, z. B. <sup>60</sup>Co.
- Aktinide (Actinoide): erbrüteter oder unverbrauchter Kernbrennstoff und dessen Tochterprodukte. Sie bilden Zerfallsketten mit hohem Anteil an  $\alpha$ -Zerfällen, ein Beispiel ist <sup>239</sup>Pu.

Die Aktivitätsgehalte in verbrauchten Kernbrennstoffen sind sehr hoch (bis zu einigen  $10^{18}$  Bq pro Tonne zum Zeitpunkt der Entladung). Mit der Aktivität geht eine Wärmeproduktion von  $10^3$  kW pro Tonne einher. Beide Werte werden

<sup>2</sup> 1 Bq = eine Kernumwandlung pro Sekunde. Im menschlichen Körper finden mehrere tausend Kernumwandlungen pro Sekunde statt.

Halbwertszeit: Zeit, in der die Hälfte einer Menge eines bestimmten Radionuklids umgewandelt (meist: „zerfallen“) ist. Da die Aktivität zu einem bestimmten Zeitpunkt proportional zur zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Stoffmenge des Nuklids ist, sinkt nach Ablauf einer Halbwertszeit auch die Aktivität dieses Nuklids und damit die aus dessen Kernumwandlungen resultierende Strahlenemission auf die Hälfte. Falls das resultierende so genannte „Tochternuklid“ wieder radioaktiv ist, führt dies zu weiteren Strahlenemissionen. Je höher die Zerfallskonstante, also der Anteil von Kernen, der pro Zeiteinheit umgewandelt wird, ist, desto geringer ist die Halbwertszeit (und umgekehrt).

<sup>3</sup> Die hochgestellte Zahl kennzeichnet die Massenzahl (auch: Nukleonenzahl). Auch andere Schreibweisen sind gebräuchlich: <sup>232</sup>Th, <sup>232</sup>Th, Th-232, Thorium-232.

zum Zeitpunkt der Entladung vor allem durch den Anteil an Spaltprodukten bestimmt. Sie sind sowohl von der Anfangsanreicherung<sup>4</sup> als auch dem Abbrand<sup>5</sup> abhängig und sinken im Lauf der ersten zehn Jahre nach Entladung auf ca. ein Promille des Ausgangswertes.

### **Hochradioaktive (wärmeentwickelnde) Abfälle: Wiederaufarbeitung und Zwischenlagerung**

Der oben eingeführte Begriff „Abbrand“ weist darauf hin, dass der Verbrauch der spaltbaren Materialien und die Ausnutzung der Kernenergie im Kernreaktor variieren können, jedoch aus technischen Gründen nie vollständig sein werden. Die in „verbrauchten“ Kernbrennstoffen enthaltenen verbliebenen bzw. durch Kernumwandlungen „erbrüteten“ Actinoide, insbesondere Plutonium und Uran, könnten – zumindest theoretisch – durch weitere Kernspaltungen noch weiter energetisch „ausgebeutet“ werden. Abgesehen von einer Erhöhung des Abbrands, die jedoch technische Probleme mit sich bringt, kann dies durch ein „Recycling“ der verbrauchten Kernbrennstoffe geschehen. Der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente liegt ursprünglich dieser Gedanke zugrunde. Heutiger kerntechnischer Standard zur Wiederaufarbeitung ist das so genannte PUREX-Verfahren (Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction). Wie die Bezeichnung sagt, zielt das Verfahren auf die Gewinnung von Plutonium und Uran, woraus dann so genannte Mischoxid-Brennelemente (MOX) hergestellt werden können. Die energetisch wertlosen Spaltprodukte und andere Radionuklide werden abgetrennt und gelangen als verglaste hoch radioaktive (Wärme entwickelnde) Abfälle in Stahlkokillen (ca.  $10^{15}$  Bq pro Kokille, hauptsächlich durch die Spaltprodukte  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$ , beide mit einer Halbwertszeit von ca. 30 Jahren).

Das PUREX-Verfahren wird in den Wiederaufarbeitungsanlagen in La Hague (Normandie) und Sellafield (Nordengland) industriell eingesetzt, für eine weitere Anlage in Rokkasho (Japan) ist der Betriebsbeginn in den nächsten Jahren geplant. Die in den 1980er Jahren geplante deutsche industrielle Wiederaufarbeitungsanlage im bayerischen Wackersdorf wurde insbesondere wegen des Widerstands in der Gesellschaft nie fertiggestellt. In diesen und anderen Ländern gab bzw. gibt es eine Reihe weiterer unterschiedlicher Wiederaufarbeitungsanlagen (auch Versuchs- und Pilotanlagen). Wiederaufarbeitung in großem Maßstab betreibt insbesondere Russland.

---

<sup>4</sup> Anteil des für die Kernspaltung wesentlichen  $^{235}\text{U}$  im neu produzierten Kernbrennstoff

<sup>5</sup> Grad der Ausnutzung der Energie des Kernbrennstoffs, genauer: Verhältnis der im Kernbrennstoff erzeugten Energie zur Masse des enthaltenen Schwermetalls

Bei einer Entscheidung, ob verbrauchte Kernbrennstoffe wiederaufgearbeitet werden sollten, müssen viele Aspekte berücksichtigt werden (Dutton et al. 2004, McCombie et al. 2010):

- **Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit:** Der Einsatz teurer Technologie zur Wiederaufarbeitung, also besseren Ausnutzung des Energiegehalts der Kernbrennstoffe lohnt sich vor allem dann, wenn die Uranpreise vergleichsweise hoch sind. Ein Vorteil einer solchen Verbesserung kann auch darin liegen, dass die Abhängigkeit von der Bereitstellung von Natururan aus z. T. politisch instabilen Regionen sinkt.
- **Perspektive der Stromerzeugung aus Kernenergie:** Wiederaufarbeitung ist insbesondere dann sinnvoll, wenn sie im Kontext eines langfristigen Kernenergieprogramms, insbesondere in Verbindung mit dem Einsatz fortgeschrittener Reaktorkonzepte, geplant wird – nicht sinnvoll ist sie jedoch für Länder, die einen baldigen Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie vorsehen.
- **Waffenfähiges Material:** Das bei der Wiederaufarbeitung anfallende Plutonium kann für die Produktion von Kernwaffen genutzt werden. Dies ist einerseits von Bedeutung für Kernwaffenmächte, andererseits besteht die Gefahr einer Weitergabe des Materials an Dritte („Proliferation“). Ein Proliferationsrisiko besteht auch für verbrauchte Kernbrennstoffe, nicht jedoch für die verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung.
- **Umweltschutz und Transporte:** Wiederaufarbeitung ist mit der Ableitung radioaktiver Stoffe aus den Anlagen verbunden. Auch wenn diesbezügliche Grenzwerte eingehalten werden, bedarf eine solche – auch geringfügige – Freisetzung gemäß der Vorgaben des Strahlenschutzes doch der Rechtfertigung. Wiederaufarbeitung geht mit einer erhöhten Anzahl von Transporten hoch radioaktiver Stoffe (zu und von den Wiederaufarbeitungsanlagen) einher.
- **Abfälle:** Sind verbrauchte Kernbrennstoffe zur Wiederaufarbeitung vorgesehen, so gelten sie als Wertstoffe, nicht als Abfall. Die entstehenden hoch radioaktiven verglasten Abfälle mit den Spaltprodukten weisen ein um ein Vielfaches geringeres Volumen auf. Sie sind ein standardisiertes Qualitätsprodukt mit einer für die Endlagerung günstigen hohen Beständigkeit. Daneben fallen weitere schwach- und mittelaktive Abfälle bei der Wiederaufarbeitung an. Zu klären ist jeweils, ob das bei der Wiederaufarbeitung gewonnene Uran und Plutonium tatsächlich komplett wieder verwertet wird, oder ob ein Teil davon später doch als zu entsorgender Abfall zu deklarieren ist.

In Deutschland gab es aufgrund dieser komplexen Sachverhalte und wechselnder politischer Vorgaben eine Reihe von Änderungen bezüglich der Frage der Wiederaufarbeitung, die in einer recht unübersichtlichen Situation hinsichtlich der Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle resultieren:

- Bis 1994 war die Wiederaufarbeitung der einzige zulässige Entsorgungsweg für verbrauchte Kernbrennstoffe, eine zentrale Zwischenlagerung des resultierenden verglasten hochaktiven Abfalls sollte in Gorleben erfolgen. Ursprünglich war eine Wiederaufarbeitung in Deutschland geplant (WAA Wackersdorf), nach Aufgabe dieses Plans wurden verbrauchte Kernbrennstoffe zur Wiederaufarbeitung nach England (Sellafield) und Frankreich (La Hague) verbracht und die zurückzunehmenden verglasten Abfälle zum zentralen Zwischenlager nach Gorleben transportiert.
- Seit 1994 ist neben diesem Entsorgungsweg auch die so genannte direkte Endlagerung von verbrauchten Kernbrennstoffen zulässig. Für deren zentrale Zwischenlagerung waren die Lager in Gorleben und Ahaus, später auch in Lubmin (hauptsächlich für Kernbrennstoffe aus den neuen Bundesländern) vorgesehen.
- Mit dem „Atomkonsens“ von 2000 ging ein Verbot von Transporten zur Wiederaufarbeitung von 2005 an einher, gleichzeitig sollten die noch anfallenden verbrauchten Kernbrennstoffe dezentral an den Standorten der Kernkraftwerke zwischengelagert werden.
- Schließlich wurde mit dem Standortauswahlgesetz von 2013 der Transport der noch erwarteten Wiederaufarbeitungsabfälle nach Gorleben verboten, diese sollen ebenfalls in dezentrale Zwischenlager verbracht werden (BMUB 2015c).

Dies mündete in die Situation, dass Deutschland heute über drei zentrale Zwischenlager (Ahaus und Lubmin für verbrauchte Kernbrennstoffe, Gorleben zusätzlich auch für Wiederaufarbeitungsabfälle) verfügt, zu denen 12 dezentrale Zwischenlager für verbrauchte Kernbrennstoffe an den Standorten von Kernkraftwerken kommen. Einige davon werden künftig auch Wiederaufarbeitungsabfälle aufnehmen. Zu beachten ist, dass diese dezentralen Lager Infrastruktur und Personal der jeweiligen Kernkraftwerke nutzen, ihre Lebensdauer die der Kraftwerke aber wegen des Fehlens einer Entsorgungslösung deutlich übersteigen wird.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Vereinfachte Darstellung. Nach dem Entladen aus dem Reaktor gelangen die Kernbrennstoffe (Brennelemente) zunächst in Abklingbecken, bevor sie transportiert und oder trocken zwischengelagert werden können. Auch die Abklingbecken sind ihrem Wesen nach Zwischenlager. Auch die Zwischenlagerung von Kernbrennstoffen aus Versuchs- und Forschungsreaktoren wurde in der Darstellung nicht berücksichtigt.

## **Abtrennung (Partitioning) und Transmutation: „Warten auf neue Technologien“?**

In der Debatte um die Entsorgung insbesondere hoch radioaktiver Abfälle wird immer wieder argumentiert, dass künftig innovative Technologien zur Verfügung stehen könnten, die das Schadenspotential verringern und eine Endlagerung vereinfachen oder gar überflüssig machen könnten. Nach Auffassung des Autors wird in diesen Debatten weitgehend ausgeblendet, dass solche (Kern-)Technologien nicht „vom Himmel fallen“. Ihre Entwicklung erfordert zunächst einen entsprechenden Willen, der sich in umfangreichen Investitionen niederschlagen müsste.

Die einzige Technologie(-Klasse), für die gegenwärtig tatsächlich in umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsprogramme investiert wird, sind so genannte Abtrennungs- und Transmutationstechnologien (P & T für englisch „partitioning and transmutation“). In der Tat wurde in den 90er Jahren des vorigen Jahrhunderts die Vorstellung erster P&T-Konzepte mit dem Versprechen verbunden, eine Endlagerung überflüssig zu machen.

Unter Transmutation ist die Umwandlung von Nukliden durch Kernreaktionen in Reaktoren oder Teilchenbeschleunigern, ausgelöst durch Neutronenbeschuss, zu verstehen. Das Ziel von Transmutationen ist die Erzeugung kurzlebigerer oder gar stabiler Nuklide. Vor der Transmutation ist eine (chemische) Abtrennung der zu transmutierenden Stoffe, quasi eine Form von Wiederaufarbeitung, notwendig. P&T-Technologien werden häufig in Zusammenhang mit Projekten zur Kernenergiegewinnung mit fortgeschrittenen Reaktorkonzepten betrachtet. Ihre industrielle Implementierung ist frühestens in einigen Jahrzehnten zu erwarten. Ähnlich wie im Fall der Wiederaufarbeitung ist auch bei der Betrachtung von P&T-Technologien ein komplexes Geflecht technologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Sachverhalte zu berücksichtigen. Hier soll nur auf wenige wesentliche Gesichtspunkte im Hinblick auf die Abfallentsorgung eingegangen werden, für weitergehende Ausführungen vgl. z.B. (acatech 2013, 2014, ESK 2015):

Zunächst ist anzumerken, dass P&T nur für verbrauchte Kernbrennstoffe umsetzbar ist, jedoch nicht für verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Mittels P&T kann die Radiotoxizität, also die schädliche Wirkung der Stoffe bei Ingestion<sup>7</sup> oder Inkorporation<sup>8</sup>, innerhalb einiger Jahrzehnte deutlich verringert werden. Gleiches gilt für die Wärmeleistung, die ein entscheidender Faktor für den Platzbedarf in einem Endlager ist. Beide Effekte werden jedoch erst bei einer Zwischenlagerung über einige Jahrzehnte wirksam, eine Entsorgung würde also weiter verzögert.

---

<sup>7</sup> Aufnahme des radioaktiven Stoffes über Mund bzw. Verdauungstrakt

<sup>8</sup> Aufnahme über Haut oder Lunge

Die Verringerung der Radiotoxizität wird im Wesentlichen durch die Transmutation von Actinoiden erreicht. Diese sind jedoch im Untergrund nur gering mobil. Das Gefahrenpotential eines Endlagers wird weniger durch die hoch radiotoxischen aber wenig mobilen Actinoide, sondern eher durch die hoch mobilen Spaltprodukte bestimmt. Demzufolge wird das Gefahrenpotential bei einer Transmutation von Actinoiden nur wenig beeinflusst. Bei einer Entsorgung ist außerdem zu berücksichtigen, dass bei der Anwendung von P&T-Verfahren in größerem Umfang schwach- und mittelaktiver Abfälle anfallen werden. Deren genaue Menge und Zusammensetzung ist zum großen Teil noch zu klären. Zusammenfassend ist also festzustellen, dass P&T-Verfahren ggf. eine Erleichterung, aber keine prinzipielle Lösung des Abfallproblems bieten.

### **Abfallkategorien und Entsorgungslösungen**

Die internationale Atomenergiebehörde IAEA kategorisiert radioaktive Abfälle nach deren Aktivitätsgehalt und Lebensdauer und schlägt – abgestuft nach Gefahrenpotential – für unterschiedliche Kategorien unterschiedliche Entsorgungslösungen vor (IAEA 2009):

- Freigabeabfall: Freigabe aufgrund extrem geringer Aktivitätskonzentrationen, Behandlung wie „konventioneller“ Abfall
- Sehr schwach aktiver Abfall: Deponielösungen (ähnlich wie „konventionelle“ Abfalldeponien)
- Sehr kurzlebiger Abfall: Zerfalls-(Zwischen-)Lagerung, dann Freigabe
- Schwach aktiver Abfall: oberflächennahe Endlagerung
- Mittelaktiver Abfall: Endlagerung in „mittlerer Tiefe“ (einige Dutzend Meter)
- Hoch aktiver Abfall: Tiefe („geologische“) Endlagerung (mindestens einige hundert Meter Tiefe)

In Deutschland wird lediglich zwischen „Wärme entwickelnden Abfällen“ (hoch aktiven Abfällen) und „Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung“ (schwach- und mittelaktiven Abfällen) unterschieden. Für beide Kategorien ist die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorgesehen.

### **Tiefenlager in Steinsalz, Ton(stein) und kristallinen Hartgesteinen (z. B. Granit)**

Wie oben erläutert, ist die Endlagerung in (mehrere hundert Meter) tiefen geologischen Formationen insbesondere für hoch radioaktive Abfälle vorgesehen.



Sie kommt jedoch auch für schwach und mittlerradioaktive Abfälle zur Anwendung. Gedankliche Grundlage ist der Wunsch, die Sicherheit der Anlage über lange Zeiträume ohne späteres menschliches Zutun (wie z.B. Überwachung, Wartung, Reparatur, Umlagerung) in einem wartungsfreien System geologischer, geotechnischer und technischer Barrieren zu gewährleisten („passive Sicherheit“). Damit wird zum einen das Ziel verfolgt, Sicherheit unabhängig vom unkalkulierbaren Wandel gesellschaftlicher und ökonomischer Verhältnisse zu gewährleisten. Zum anderen liegt der Idee ein Begriff von Gerechtigkeit zugrunde, der künftige Generationen von der Verantwortung für die Abfälle befreit („Sorgenfreiheit“), ihnen allerdings auch wenig Spielraum bei einem möglichen Wunsch nach weiterem Umgang mit den Abfällen (z. B. nach Wiederverwertung oder Behandlung zur Verringerung des Schadenspotentials) lässt (wenig „Handlungsfreiheit“).

Für Endlagerung in tiefen geologischen Formationen werden unterschiedliche so genannte Wirtsgesteine (Gesteine, die die Abfälle aufnehmen) untersucht. Keines dieser Gesteine weist alle wünschenswerten physikalischen und chemischen Eigenschaften auf. Es gilt also immer, mittels technischer und geotechnischer Komponenten ein System zu schaffen, das die günstigen Eigenschaften des jeweiligen Wirtsgesteins ausnutzt und die weniger günstigen kompensiert:

- In mechanisch vorteilhaften **kristallinen Hartgesteinen** (z. B. Granit) ist mit wasserführenden Klüften zu rechnen. Einschlägige Konzepte (Schweden, Finnland) setzen daher auf einen langfristigen Einschluss (einige hunderttausend Jahre) in einem mit Kupfer ummantelten Behälter. Dessen chemische und mechanische Stabilisierung erfolgt durch die Einlagerung in ein quellfähiges Tonmaterial („Bentonitpuffer“).
- In **Ton** bzw. **Tonstein** ist ein Einschluss der Abfälle im Behälter nur für einige hundert Jahre erforderlich. Wesentliches Element des Konzepts ist die Behinderung der Migration der Schadstoffe durch das sehr gering durchlässige Wirtsgestein und die Verschlüsse der Einlagerungshohlräume. Eine Migration kann nur durch Diffusion erfolgen, die überdies durch Sorption an der Feststoffmatrix verlangsamt wird.
- Im **Steinsalz** soll der langfristige Einschluss der Schadstoffe durch das praktisch undurchlässige Wirtsgestein erfolgen. Hohlräume werden mit Salzgrus versetzt, der aufgrund des Gebirgsdrucks kompaktiert und ähnliche Eigenschaften wie das Wirtsgestein annimmt.

Mit einem Betriebsbeginn der ersten Endlager für hoch radioaktive Abfälle wird in den 20er Jahren in Schweden, Finnland (in beiden Ländern direkte Endlagerung verbrauchter Kernbrennstoffe in Kristallingestein) und Frankreich (Endlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen im Tonstein) gerechnet.

## Abfallaufkommen und Endlagerprojekte in Deutschland

In Deutschland wird für das Jahr 2080 mit ca. 304.000 m<sup>3</sup> radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (schwach- und mittelaktive Abfälle mit weniger als 1% der Gesamtaktivität des Abfallaufkommens) sowie ca. 28.100 m<sup>3</sup> wärmeentwickelnder (hoch aktiver) Abfälle gerechnet. Für den Fall einer Rückholung der im Schacht Asse II eingelagerten Abfälle (s. unten) würde zusätzlich ein Abfallvolumen der nach der Rückholung konditionierten Abfälle von ca. 175.000 bis 220.000 m<sup>3</sup> für die spätere Endlagerung anfallen. Weiterhin kann abgereichertes Uran aus der Urananreicherung (so genannte Urantails), das derzeit (noch) nicht als Abfall deklariert ist, zur Entsorgung sein. Das BMUB rechnet vorsorglich mit einer Abfallmenge von bis zu 100.000 m<sup>3</sup> (BMUB 2015a, b, BfS 2016).

In Deutschland bestanden bzw. bestehen folgende Endlagerprojekte:

- Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wurde in der DDR für schwach- und mittelaktive Abfälle in einem stillgelegten Kali- und Steinsalzbergwerk errichtet. Die Anlage wurde entsprechend des Einigungsvertrages vom Bund übernommen und bis 1998 für die Einlagerung weiterer Abfälle genutzt. Derzeit läuft das Planfeststellungsverfahren für den Verschluss der Anlage.
- Die Schachthanlage Asse II (bei Wolfenbüttel) ist ebenfalls ein ehemaliges Kali- und Steinsalzbergwerk. Neben Forschungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle erfolgte hier eine zunächst als Versuchseinlagerung bezeichnete Einlagerung von schwach- und mittelaktiven Abfällen. Nach Einschätzung des Bundesamtes für Strahlenschutz ist nach jetzigem Kenntnisstand die Rückholung die beste Variante für den weiteren Umgang mit den dort eingelagerten radioaktiven Abfällen. Die Zielsetzung einer Rückholung ist gesetzlich fixiert.
- Das ehemalige Eisenerzbergwerk Konrad bei Salzgitter wird gegenwärtig für die Einlagerung des überwiegenden Teils der oben erwähnten 304.000 m<sup>3</sup> radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (schwach- und mittelaktive Abfälle) umgerüstet. Der Planfeststellungsbeschluss würde eine Einlagerung der oben aufgeführten zusätzlichen 175.000 bis 220.000 m<sup>3</sup> Abfälle aus der Schachthanlage Asse II sowie des abgereicherten Urans aus der Urananreicherung nicht zulassen.
- In der Vergangenheit wurde der Salzstock Gorleben hinsichtlich seiner Eignung für die Einlagerung von Abfällen aller Kategorien, aber insbesondere der hochaktiven (Wärme entwickelnden) Abfälle erkundet. Der Standort (sowohl der Salzstock als auch das übertägige Zwischenlager, siehe oben) war immer wieder Gegenstand gesellschaftlicher Konflikte in Zusammen-

hang mit der Nutzung der Kernenergie in Deutschland. Diese entluden sich insbesondere anlässlich der Transporte von Wiederaufarbeitungsabfällen aus Frankreich in das Zwischenlager. Der Erkundungsbetrieb wurde im Jahr 2000 für zehn Jahre unterbrochen. Im Zuge der „Energiewende“ wurde 2013 mit dem Standortauswahlgesetz (vgl. den nachfolgenden Abschnitt) eine neue Standortauswahl für ein Endlager für insbesondere hoch radioaktive Abfälle eingeleitet, die Gorleben-Erkundung wurde eingestellt.

### **Standortauswahlgesetz und „Endlagerkommission“**

2013 wurde mit einer breiten Zustimmung (CDU/CSU, SPD, FDP und Grüne) das Standortauswahlgesetz verabschiedet (StandAG 2013). Es soll den Weg zu einer neuen Standortauswahl eröffnen und damit zur Beilegung des gesellschaftlichen Konflikts um die Endlagerung beitragen. Seine Eckpunkte sind:

- Es soll ein unvoreingenommener, wissenschaftsbasierter, transparenter Standortauswahlprozess eingeleitet werden, bei dem die Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin zu berücksichtigen sind.
- Die Entsorgung soll innerhalb Deutschlands erfolgen.
- Eine Standortfestlegung ist für das Jahr 2031 vorgesehen.
- Der auszuwählende Standort soll die bestmögliche Sicherheit über eine Million Jahre gewährleisten.
- Das Auswahlverfahren ist mit Beteiligung der Öffentlichkeit in einem breiten Konsens durchzuführen.
- An wichtigen Meilensteinen sind Parlamentsentscheidungen vorgesehen.
- Wichtiges Ziel ist die Wahrnehmung der Verantwortung für die Abfälle durch die heutige Generation.
- Eine Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ soll Empfehlungen zu wichtigen Eckpunkten des Verfahrens – auch zur Überarbeitung des Gesetzes selbst – erarbeiten.

Die Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ stellte bereits in ihrer Zusammensetzung ein Novum dar: Vertreten waren gesellschaftliche Gruppen und Interessenvertreter (Industrie, Kirchen, Umweltorganisationen, Gewerkschaften – je Gruppe 2 Sitze), Wissenschaftler (8 Sitze) und die Politik (je 8 Sitze für Bundestag und Bundesrat). Hinsichtlich des Abschlussberichts waren die Vertreter von Bundestag und Bundesrat nicht stimmberechtigt.

### Die Kommission hatte die Aufgaben

- prinzipielle Fragen, zum Beispiel zu möglichen Alternativen zum Entsorgungsweg „Endlagerung“ zu klären,
- Kriterien für die Standortauswahl zu erarbeiten,
- dabei die Erfahrungen anderer Länder einzubeziehen,
- Empfehlungen zu Sicherheitsanforderungen zu formulieren,
- Anforderungen bzgl. von Öffentlichkeitsbeteiligung, Information und Transparenz zu erarbeiten und
- das Standortauswahlgesetz zu evaluieren.

Der am 5. Juli 2016 übergebene Abschlussbericht der Kommission (Endlagerkommission 2016) empfiehlt den „Entsorgungspfad“ **Endlagerbergwerk mit Reversibilität** mit folgenden Etappen:

- Etappe 1 – Standortauswahlverfahren
- Etappe 2 – Bergtechnische Erschließung des Standortes
- Etappe 3 – Einlagerung der radioaktiven Abfälle in das Endlagerbergwerk
- Etappe 4 – Beobachtung vor Verschluss des Endlagerbergwerks
- Etappe 5 – Verschlussenes Endlagerbergwerk

Die Kommission spricht Empfehlungen zum Standortauswahlverfahren aus, diese betreffen sowohl den Verfahrensablauf als auch die anzuwendenden Kriterien und die Öffentlichkeitsbeteiligung. Außerdem werden Empfehlungen zur Organisationsstruktur in Deutschland und zur Gesetzgebung ausgesprochen.

Gegenwärtig (Februar 2017) wird das Standortauswahlgesetz auf der Basis des Kommissionsberichts überarbeitet.

Nach Auffassung des Autors sind viele der empfohlenen geowissenschaftlichen Kriterien für die Standortauswahl sinnvoll und adäquat, einige jedoch auch unangemessen. Der Kriteriensatz ist nicht vollständig konsistent, dies betrifft insbesondere die Behandlung kristalliner Wirtsgesteine. Hier und an anderer Stelle wird – belegt durch diverse Sondervoten – deutlich, dass der Bericht eine Mischung aus wissenschaftlichem Konsens und politischem Kompromiss darstellt. Die Bedeutung von Sicherheitsuntersuchungen, die insbesondere bei der Abwägung möglicherweise konkurrierender bzw. gegenläufiger Kriterien sowie bei der Festlegung von Erkundungsprogrammen essentiell sind, sollte besser herausgearbeitet werden.

## Forschungsthemen

Angesichts der Neuorientierung hinsichtlich der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland ergeben sich auch z.T. neue Anforderungen an die Gestaltung der diesbezüglichen Forschung. Hier soll lediglich eine (notwendigerweise subjektive) Auswahl der künftig relevanten Themen zusammengestellt werden, zu ausführlicheren Informationen vgl. (BMWi 2015, ESK 2016):

- Für die verschiedenen in Betracht kommenden Wirtsgesteine sind jeweils Behälterkonzepte zu entwickeln. Die jeweiligen Verschlusskonzepte sind weiter zu entwickeln und zu optimieren. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf Anforderungen zur Rückholbarkeit; allgemeiner sind Rückholbarkeitskonzepte (weiter) zu entwickeln und es ist zu zeigen, dass die Rückholvorgänge sicher erfolgen können.
- Es sind Abwägungsmethoden für den sicherheitsgerichteten Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen zu entwickeln.
- Das Verständnis und die Modellierung der verschiedenen im Endlagersystem ablaufenden gekoppelten thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen<sup>9</sup> Prozesse ist weiter zu entwickeln.
- In der Vergangenheit wurden bereits umfangreiche Forschungsarbeiten zur Endlagerung im Steinsalz (insbesondere in steiler Lagerung, in Salzstöcken) durchgeführt. Noch zu klärende Fragen betreffen u. a. die Möglichkeiten einer verbesserten zerstörungsfreien Erkundung der Internstruktur von Salzformationen und eventueller Fluidvorkommen. Die sicherheitstechnische Bedeutung von Kohlenwasserstoffen sowie das Kompaktionsverhalten des Verfüllmaterials Salzgrus sind weiter zu untersuchen. Untersuchungen zu den abweichenden Bedingungen für Salzformationen in flacher Lagerung sind notwendig.
- Hinsichtlich einer Endlagerung in Tonstein ist die Entwicklung bzw. Anpassung von im Ausland vorhandenen technischen Konzepten für die deutsche Situation erforderlich. Darüber hinaus sind teufenabhängige gebirgsmechanische Effekte sowie das Diffusionsverhalten in Tonsteinformationen in Deutschland von Interesse.
- Für die Endlagerung in kristallinen Hartgesteinen sind ein Kristallin-spezifisches Sicherheits- und Nachweiskonzept zu entwickeln. Auch hier ist eine Entwicklung bzw. Anpassung von im Ausland vorhandenen technischen Konzepten für die deutsche Situation notwendig. Fragen der Standortcharakterisierung sind zu klären.

---

<sup>9</sup> Oft mit dem Kürzel „TH<sup>2</sup>MC“ bezeichnet, die hochgestellte „2“ symbolisiert Zweiphasenströmungen.

- Angesichts der Herausforderungen des sozio-technischen Prozesses der Standortauswahl ergibt sich eine Vielzahl von Fragestellungen an der Schnittstelle zwischen Naturwissenschaft und Technik einerseits sowie Gesellschaft andererseits, die Gegenstand innovativer inter- und transdisziplinärer Forschung sein müssen. Dies betrifft z. B. die Gestaltung gesellschaftlicher Prozesse, insbesondere die Entscheidungsfindung, die Balance zwischen Öffentlichkeitsbeteiligung und Übernahme von Verantwortung sowie den Umgang mit unterschiedlichen Risikowahrnehmungen.

### **Schluss: Wo stehen wir?**

Für die Entsorgung der ca. 304.000 m<sup>3</sup> radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird – wenn auch deutlich später als geplant – voraussichtlich das Endlager Konrad zur Verfügung stehen. Ungeklärt ist dagegen die Frage, ob eine Rückholung der Abfälle aus dem Schacht Asse II gelingen wird und wo die zurückgeholten Abfälle dann verbleiben sollen. Gleichfalls unklar ist die Entsorgung der Urantails aus der Urananreicherung (Endlagerkommission 2015).

Hinsichtlich der hoch radioaktiven (Wärme entwickelnden) Abfälle zeichnet sich mit dem durch das Standortauswahlgesetz eingeleiteten Kompromiss – bei allen fachlichen Schwächen – doch die Möglichkeit einer Befriedung eines gesellschaftlichen Dauerkonflikts ab. Es wird sich zeigen, ob diese Chance genutzt werden kann. Angesichts der technischen und prozeduralen Herausforderungen der nächsten Jahre ist dem Erhalt und der Heranbildung der notwendigen Kompetenz, insbesondere der disziplinären und interdisziplinären Nachwuchsförderung, besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

### **Literatur**

acatech (2013): Partitionierung und Transmutation. Forschung – Entwicklung – Gesellschaftliche Implikationen, acatech STUDIE, München: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.

acatech (2014): Partitionierung und Transmutation nuklearer Abfälle. Chancen und Risiken in Forschung und Anwendung, acatech POSITION, München: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.

BfS (2016): Abfallprognosen. [[http://www.bfs.de/DE/themen/ne/abfaelle/prognosen/prognosen\\_node.html](http://www.bfs.de/DE/themen/ne/abfaelle/prognosen/prognosen_node.html)], zuletzt eingesehen: 05.01.2016].

BMUB (2015a): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

BMUB (2015b): Verzeichnis radioaktiver Abfälle (Bestand zum 31. Dezember 2014 und Prognose), Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

BMUB (2015c): Pressemitteilung Nr. 341/15. Bund und Bayern erzielen Einigung zur Rücknahme von Castor-Behältern. [[http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/bund-und-bayern-erzielen-einigung-zur-ruecknahme-von-castor-behaeltern/?tx\\_ttnews\[backPid\]=103&cHash=b9777cdc10ea319f33f6a88dda2d2d73](http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/bund-und-bayern-erzielen-einigung-zur-ruecknahme-von-castor-behaeltern/?tx_ttnews[backPid]=103&cHash=b9777cdc10ea319f33f6a88dda2d2d73), zuletzt eingesehen: 05.01.2016].

DUTTON, M., K. HILLIS, J. STANSBY, L. KENNETT, T. SEPPÄLÄ, R.M. MACIAS, K.-J. RÖHLIG, B. HAVERKATE, P. O'SULLIVAN, A. MRSKOVA, J. PRÍTRSKÝ, J. ALONSO DÍAZ TERÁN, J.M. VALDIVIESO RAMOS, L. MORÉN, M. HUGI, P. ZUIDEMA, S. KING & B. BREEN (2004): The Comparison of Alternative Waste Management Strategies for Long-Lived Radioactive Wastes (COMPAS Project), EUR 21021 EN, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

BMW: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. Förderkonzept des BMW (2015–2018). herausgegeben durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Referat IIA5 „Reaktorsicherheits- und Endlagerforschung, Uranbergbausanierung“ und Projektträger Karlsruhe – Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), Karlsruher Institut für Technologie [[https://www.ptka.kit.edu/downloads/ptka-wte-e/Foerderkonzept\\_2015-2018.pdf](https://www.ptka.kit.edu/downloads/ptka-wte-e/Foerderkonzept_2015-2018.pdf), zuletzt eingesehen: 07.01.2016]

Endlagerkommission (2015): Pressemitteilung Nr. 18/2015. Bedenken in Endlager-Kommission gegen Mehrzweck-Standort. [[http://www.bundestag.de/blob/386110/6eaf5870d3958c2934774df2330e6cd3/pressemitteilung\\_018-data.pdf](http://www.bundestag.de/blob/386110/6eaf5870d3958c2934774df2330e6cd3/pressemitteilung_018-data.pdf), zuletzt eingesehen: 25.02.2016].

Endlagerkommission (2016): Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Abschlussbericht. Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandorts. Berlin

ESK (2015): DISKUSSIONSPAPIER der Entsorgungskommission. Partitionierung und Transmutation (P&T) als Option für die nukleare Entsorgung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. [[http://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/diskussionspapierput18062015\\_0.pdf](http://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/diskussionspapierput18062015_0.pdf), zuletzt eingesehen: 07.01.2016].

ESK (2016): STELLUNGNAHME der Entsorgungskommission. Endlagerforschung in Deutschland: Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung [<http://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/stnendlagerforschung12052016.pdf>, zuletzt eingesehen: 01.02.2017]

IAEA (2009): Classification of Radioactive Waste. General Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. GSG-1, Vienna: International Atomic Energy Agency.

MCCOMBIE, C., T. ISAACS, N. BIN MUSLIM, T. RAUF, A. SUZUKI, F. VON HIPPEL & E. TAUSCHER (2010): Multinational Approaches to the Nuclear Fuel Cycle, Cambridge: American Academy of Arts and Sciences.

StandAG (2013): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, Standortauswahlgesetz vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2553).